第65卷 第3期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 3
2024年5月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.03.006

明安图射电频谱日像仪图像的强度定标方法*

周志超[1,2†] 陈林杰[1] 颜毅华[1,2‡] 王 威[1]

(1 中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)
(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 明安图射电频谱日像仪(Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER)能够在0.4–15 GHz超宽频带内实现高时间、高空间、高频率分辨率的太阳射电成像. 而射电亮温度是描述太阳物理过程的一个重要的参数, 在研究不同射电辐射机制、太阳磁场以及太阳爆发过程中非热粒子加速等问题上有着非常重要的作用, 因此必须对MUSER观测的图像进行亮温度定标. 将介绍一种适用于射电日像仪图像强度定标的方法. 太阳射电图像中包含着太阳圆盘的结构信息, 利用射电日像仪短基线的可视度函数拟合第一类贝塞尔函数, 可以得到图像中宁静太阳圆盘的射电半径和强度, 再利用瑞利-金斯定律和每天的太阳射电流量可以计算得到每天图像的定标因子$G_{\rm c}$, 从而实现对MUSER图像强度的定标. 将该方法应用到MUSER的实际观测数据中, 包括宁静太阳和有太阳射电爆发等不同的情况, $G_{\rm c}$的误差基本不超过10%, 得到的宁静太阳亮温度与其他宁静太阳的结果具有较高的相关性, 表明了此方法的可行性和有效性.

关键词 太阳: 射电辐射, 仪器: 射电日像仪, 仪器: 定标
中图分类号: P162; **文献标识码**: A

1 引言

太阳射电观测可以提供从太阳色球到日地空间广阔区域中有关等离子体和高能粒子动力学行为等信息, 这是其他观测手段所不具备的, 因此, 射电观测是研究太阳物理的重要探测手段[1]. 太阳射电观测范围包括宁静太阳、耀斑、日冕物质抛射和行星际粒子等, 而太阳射电辐射由热粒子(自由-自由辐射)、中等相对论粒子(回旋同步加速辐射)以及不稳定的各向异性粒子(如电子束产生等离子体辐射、损失锥产生电子回旋脉泽辐射)产生[2]. 此外, 太阳射电爆发包含的信息与爆发类型有关, 如太阳耀斑、日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)以及各种热和非热过程. 太阳爆发被认为是由于太阳磁场的拓扑重组或磁场重联导致的瞬时能量释放过程[3]. X射线观测表明, 非热粒子与能量释放过程高度相关, 在太阳耀斑的初始阶段存在大量的耀斑能量积聚[4]. 因此, 对不同类型太阳射电暴的观测对于理解粒子加速的机制以及太阳爆发的起源和演化过程至关重要[5]. 太阳射电观测至今已有七十多年的历史, 观测设备由早期的射电流量计、射电频谱仪到现在的射电频谱日像仪. 明安图射电频谱日像仪(Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER)是太阳专用的射电望远镜, 采用综合孔径成像技术, 在0.4–15 GHz超宽频

2023-03-09收到原稿, 2023-05-25收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U2031134), 国家重点研发计划(2021YFA1600500、2021YFA1600503), 太空探索实验培育项目(TKTSPY-2020-05-02)资助

†zhouzhichao@nssc.ac.cn

‡yanyihua@nssc.ac.cn

带内同时实现了时间、空间、频率的高分辨率太阳成像[6–7]. 宽带频谱射电成像可以提供关于太阳日冕磁场、能量释放机制、高能粒子的产生和传播以及相应的辐射机制等方面的丰富信息, 并可以进一步研究和揭示太阳色球层和日冕的辐射机制[1]. 而射电亮温度是研究太阳物理过程的一个非常重要的物理参数. 因此, 对射电日像仪的图像进行亮温度定标是非常必要的.

MUSER采用综合孔径成像方式对太阳在射电波段上成像, 当观测视场很小时, 其观测天区的射电图像$I(l,m)$可通过以下的二维傅里叶变换得到[8]:

$$I^{\mathrm{D}}(l,m)=\iint_{\mathrm{baselines}}V(u,v)\mathrm{e}^{j2\pi(ul+vm)}\mathrm{d}u\mathrm{d}v\,, \tag{1}$$

其中$V(u,v)$为可视度函数, u和v分别是垂直于相位参考位置方向的平面的坐标轴分量, u是朝着通过原点的平面定义的北方, v是朝向东方, l和m是对应着图像平面中的两个坐标轴分量, 是轴u和v的方向余弦, j为虚数单位. 可视度函数$V(u,v)$通过阵列中任意两天线的信号相关得到, 其对应观测天区射电图像$I(l,m)$的傅里叶成分; 把射电阵列的所有天线两两相关(天线对)得到的可视度函数进行傅里叶反变换即可得到观测天区的射电图像. 由于实际中射电阵列的天线个数有限, 不能把射电图像的所有傅里叶成分都得到. 在这种情况下, 缺失了部分傅里叶成分的射电图像$I^{\mathrm{D}}(l,m)$被称为脏图. 因此, 需要进一步做去卷积处理得到真实的射电图像$I(l,m)$[8].

然而, 在实际观测中, (1)式中的一对基线(天线p和天线q)的可视度函数可表示如下:

$$r^{pq}=|V^{pq}|g^{pq}\exp[-j(\varphi_V^{pq}+\varphi_{\mathrm{err}}^{pq})]\,, \tag{2}$$

其中r^{pq}表示观测得到的基线$(p-q)$的干涉响应, $|V^{pq}|$是可视度函数的幅度, g^{pq}是干涉元的幅度增益, φ_V^{pq}是可视度函数的相位, $\varphi_{\mathrm{err}}^{pq}$是干涉元仪器效应带来的相位误差. 因此, 在成像之前需要对可视度函数进行校准. 当前MUSER利用风云系列同步卫星以及太阳圆盘上射电爆发源来进行相位校准[9–10]. 此外, MUSER也可以利用正在建设中的两个20 m的低频天线和一个16 m带有制冷接收机的高频天线进行MUSER阵列的校准[7, 11]. 由于MUSER相关接收机对信号进行2比特量化和相关, 系统增益对相关结果的影响不大, 因此本研究中并没有考虑系统增益的校准.

当前MUSER已经观测到很多类型的太阳射电爆发事件, 包括太阳耀斑之前和期间的准周期脉动射电爆发事件[5]、Fibers爆发结构、Spike爆发结构以及Lace爆发结构等[12]. 然而, 当前MUSER的图像还没有进行强度定标, 为了充分利用MUSER图像在太阳物理研究中的价值, 因此, 本文针对MUSER的图像提出了一种强度定标方法.

在太阳射电图像的亮温度定标研究中, 西伯利亚射电日像仪(Siberian Radioheliograph, SRH)通过分析太阳脏图的强度直方图, 获取直方图中包含的两个峰值, 它们分别对应着天空背景和宁静太阳圆盘的强度值(任意单位). 再利用Zirin等人在1986—1987年太阳黑子极小期通过单口径天线观测得到的宁静太阳的亮温度值[13], 通过以下公式实现图像的强度定标[14]:

$$C(\nu)=\left[\frac{Q(\nu)-Q_{\mathrm{lev1}}(\nu)}{Q_{\mathrm{lev2}}(\nu)-Q_{\mathrm{lev1}}(\nu)}\right]\times T_{\mathrm{quiet}}(\nu)\,, \tag{3}$$

其中$C(\nu)$为定标后的图像值, ν表示频率, $T_{\mathrm{quiet}}(\nu)$是宁静太阳的亮温度, 是通过Zirin等[13]观测到的结果得到, 并且每个频率只有一个固定值, $Q_{\mathrm{lev1}}(\nu)$和$Q_{\mathrm{lev2}}(\nu)$分别为强度直方图中的两个峰值.

针对射电源的强度定标, 扩展欧文斯谷太阳阵列(Expanded Owens Valley Solar Array, EOVSA)可以通过射电源的流量密度和射电源的面积得到对应射电源的亮温度[15].

然而, SRH (Statistical Result Histogram)的定标方法只适合宁静太阳和微弱爆发事件的图像定标, 并且太阳峰年和谷年的宁静太阳亮温度是不一样的. 因此, 基于每天的太阳射电流量, 本文提出一种适用于射电日像仪图像亮温度定标的方法, 在第2节将详细介绍定标的方法和原理, 第3节对实际的MUSER观测数据进行定标, 展示定标后的结果并加以分析, 最后为结论.

2 图像强度定标方法

2.1 宁静太阳圆盘的射电半径和强度

基于EOVSA预估射电图像中宁静太阳圆盘的射电半径和强度的思路[1], 射电日像仪观测的太阳图像数据中包含了太阳圆盘的结构信息, 阵列中短基线的可视度函数反映的是图像的大尺度结构. 因此, 短基线的可视度函数应该符合圆盘的傅里叶变换规律, 满足第一类贝塞尔函数, 即幅度具有以下关系:

$$A = Q_0 \left(\frac{2\, J_1(z)}{z} \right) , \tag{4}$$

其中$J_1(z)$是第一类贝塞尔函数, Q_0为圆盘的强度值, z是和太阳圆盘的直径有关的量, 表达式为:

$$z = \pi D \rho\, , \tag{5}$$

其中的D为弧度制下的太阳直径, ρ是波长λ单位下的uv距离, 即$\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$, D不是太阳的光球层直径, 而是不同频率的射电直径. 通过调整(4)式和(5)式中圆盘的强度Q_0和直径D可以调整对应的曲线A, 利用实际的短基线可视度数据拟合出一条最接近的曲线A, 从而得到对应的圆盘强度和直径.

SRH通过分析射电日像仪脏图的直方图, 分别统计图像中1.2倍太阳半径以外和0.8倍太阳半径以内区域的强度值, 这两部分的峰值分别对应着图像中天空背景强度值和宁静太阳圆盘强度值$T_{\rm quiet}G_{\rm c}$[9], 其中$G_{\rm c}$为射电日像仪图像的定标因子. 但实际由于宁静太阳圆盘的强度是天空背景的上万倍, 天空背景的强度不能很灵敏地体现在射电日像仪图像中. 因此, 在利用SRH的方法时我们只对MUSER图像中0.8倍太阳半径以内的区域进行了统计, 如图1所示. 图1 (a)为2016年7月5日MUSER在1.7125 GHz未定标的脏图$I^{\rm D}(l, m)$, 其中黄线以内表示光学太阳圆盘区域, 红色虚线则表示0.8倍太阳半径, 颜色棒表示其脏图中数值大小(任意单位), 图1 (b)为对图1 (a)中0.8倍太阳半径以内区域的强度值统计结果, 黑色曲线表示统计结果, 红色虚线为拟合的高斯曲线, 高斯拟合的期望值对应着第2个峰值$Q_{\rm lev2}$, 即通过统计直方图的方法得到$T_{\rm quiet}G_{\rm c} = 774806 \pm 152638$.

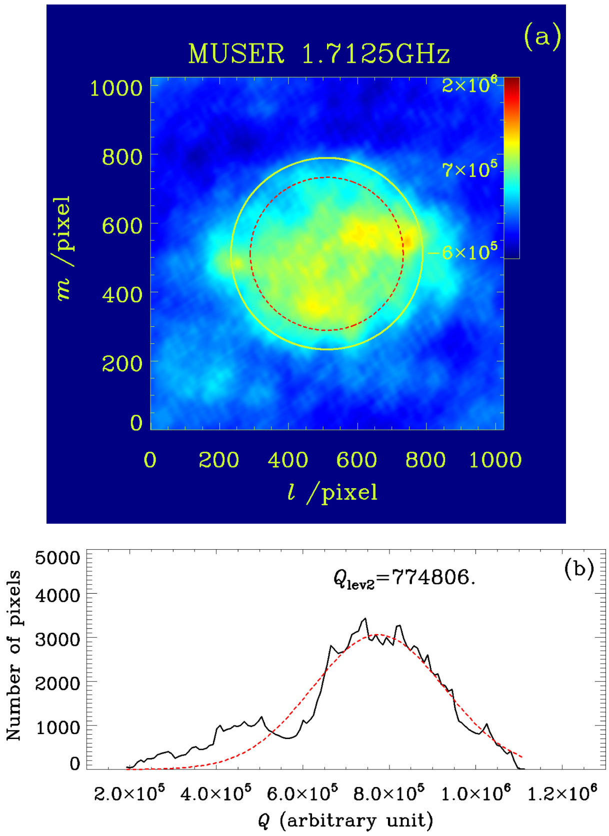

图 1 MUSER在1.7125 GHz未定标的脏图$I^{\rm D}(l, m)$和其强度Q的直方图统计结果, 都为任意单位.

Fig. 1 Uncalibrated dirty image $I^{\rm D}(l, m)$ of MUSER at 1.7125 GHz, and the histogram statistical result of its intensity Q, both are in arbitrary unit.

此外, 利用拟合第一类贝塞尔函数的方法, 我们对MUSER在2016年7月5日几个小时短基线观测到的可视度函数幅度进行分析. 通过改变(4)式和(5)式中圆盘的强度Q_0和直径D, 拟合出一条最接近观测数据的曲线A, 即找出一组(Q_0, D), 使得其差的均方根最小, 该(Q_0, D)对应MUSER图像中宁静太阳圆盘强度值$T_{\rm quiet}G_{\rm c}$和太阳圆盘直径$D_{\rm sun}$. 图2为MUSER在2016年7月5日几个小时短基线观测到的可视度函数幅度以及拟合的情况, 其中黑色星号表示MUSER在1.7125 GHz的观测数据,

[1] http://www.ovsa.njit.edu/wiki/index.php/Full_Disk_Simulations

红色的曲线则是拟合得到的最佳曲线A, 其对应圆盘直径D为35.2′, $T_{\rm quiet}G_{\rm c} = 199540 \pm 8961.2$.

对比上面两种求宁静太阳圆盘强度值$T_{\rm quiet}G_{\rm c}$的结果, 可以发现, 通过统计图像强度的直方图得到的宁静太阳圆盘强度值偏大. 这主要原因是, 尽管2016年7月5日那天太阳相对宁静, 没有射电爆发事件, 但是太阳圆面上有若干个活动区, 同时, 从射电图像上可以发现太阳圆面上有一些较强的结构信息, 这样就导致了通过统计得到的太阳圆盘强度比真实的值偏大. 相反, 利用短基线可视度函数幅度拟合第一类贝塞尔函数曲线的方法则不受这些因素影响, 拟合结果只由图像中包含的圆盘结构信息决定. 因此, 这种方法得到的宁静太阳圆盘强度比统计直方图的结果更准确. 这也印证了SRH通过统计图像强度直方图的定标方法只适用于宁静太阳以及相对较弱射电爆发事件图像的定标[14].

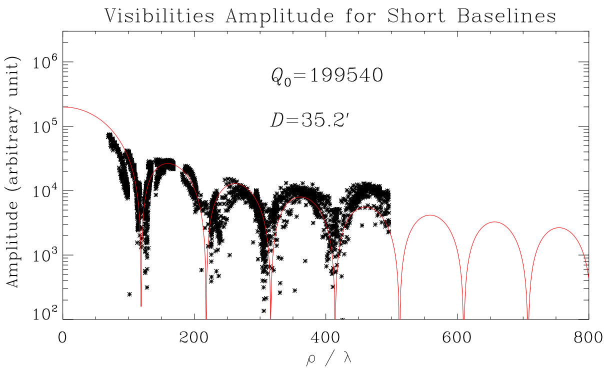

图 2 2016年7月5日MUSER在1.7125 GHz的可视度函数幅度以及拟合的曲线

Fig. 2 Visibilities amplitude of MUSER at 1.7125 GHz on July 5, 2016 and curve obtained by fitting

2.2 利用太阳射电流量来进行图像定标

根据瑞利-金斯定律[16], 可以得到太阳亮温度与太阳射电流量具有以下关系:

$$T_{\rm b} = \frac{c^2}{2\,k_{\rm B}\nu^2}\frac{S}{\Omega}\,, \tag{6}$$

其中$T_{\rm b}$为太阳亮温度, c为光速, $k_{\rm B}$为玻尔兹曼常量, Ω为太阳射电半径对应的立体角, S为太阳的射电流量. 而太阳射电流量S可以通过射电太阳望远镜网络(Radio Solar Telescope Network, RSTN)[2]每天的数据得到.

但是太阳射电图像并不是一直都是一个平坦的面源, 圆面上的活动区会导致误差, 太阳射电流量主要由平坦的圆面和活动区两部分贡献. 因此, 若减去活动区贡献的射电流量, 则利用瑞利-金斯公式可近似得到太阳圆面的射电亮温度. 这里通过射电图像中活动区的强度和面积以及整个圆面的强度, 可以计算出活动区贡献的射电流量值. 由于天空背景辐射的亮温度约为3 K[17], 远远小于太阳的亮温, 为了简化计算不考虑天空背景的辐射. MUSER图像的定标因子$G_{\rm c}$可以表示如下:

$$Q_{\rm m} = T_{\rm b}G_{\rm c}\,, \tag{7}$$

其中$Q_{\rm m}$为MUSER未定标图像中圆面上平坦区域的平均强度值, 图像定标则可以通过除以定标因子$G_{\rm c}$来实现.

3 图像的定标结果对比和分析

3.1 定标因子$G_{\rm c}$的结果分析

本方法中的定标因子$G_{\rm c}$是未定标图像的强度与射电亮温度的比值, 在理想状态下, 定标因子应该是一个固定的值. 然而, 由综合孔径的原理可知, 射电阵列只是对射电源的部分傅里叶成分进行采样, 且对于同样的天线阵列, 采样函数会随着太阳位置的变化而变化. 对于太阳角度较高的时间段内, 其短基线的uv距离变化较小, 从而对于射电图像的总强度随着时间变化的幅度较小, 因此, 在这一段时间内的定标因子相对比较稳定. 然而, 在实际观测过程中, 由于天线伺服故障以及部分基线的相关结果不理想, 导致每天的采样函数不一样, 因此, 需要每天对MUSER的图像进行强度定标.

对MUSER在2016年7月5日的观测数据进行求$G_{\rm c}$, 用2.1节方法拟合得到1.7125 GHz的太阳射电直径为35.2′, 根据RSTN数据对应1.7125 GHz的太阳射电流量为57.77 sfu. 利用2.2节中的定标方法, 得到对应的定标因子$G_{\rm c}$如图3所示, 取平均值得到当天的定标因子为$G_{\rm c} = 6.526 \pm 0.658$. 图4展示

[2]https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second/

了2015年11月22日不同频率求到的G_c值情况, 对应1.26 GHz、1.36 GHz、1.46 GHz、1.66 GHz、1.71 GHz和1.86 GHz的定标因子G_c分别为7.066 ± 0.407、9.122 ± 0.607、8.247 ± 0.718、9.387 ± 0.737、8.919 ± 0.703、6.577 ± 0.568. 从以上计算的G_c值来看, 可以发现其G_c值在一天内都保持相对稳定, 其误差在10%以内, 这也间接反映本定标方法的稳定性和可靠性.

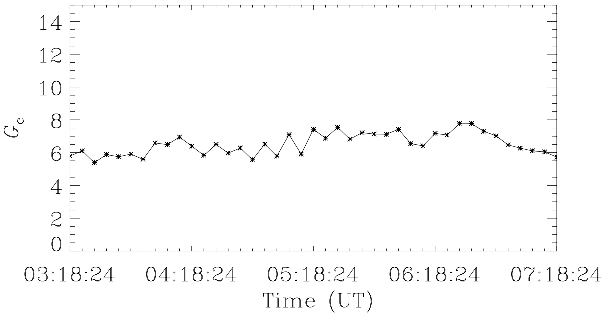

图 3　2016年7月5日MUSER在1.7125 GHz对应的G_c

Fig. 3　The G_c of MUSER at 1.7125 GHz on July 5, 2016

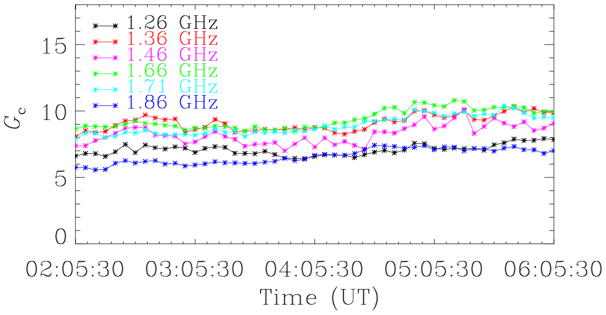

图 4　2015年11月22日不同频率MUSER图像的定标因子G_c值

Fig. 4　Calibration factor G_c values of MUSER images at different frequencies on November 22, 2015

3.2　定标后MUSER的图像分析

利用本方法分别对MUSER在2016年7月5日和2015年11月22日的观测数据进行图像定标. 这两天分别对应着宁静太阳和有太阳射电爆发的两种情况. 其中2016年7月5日定标后太阳圆盘平均亮温度与天线A2接收到的功率值对比如图5所示. 图5 (a)为2016年7月5日天线A2接收到的功率值(任意单位), 图5 (b)为定标后的太阳圆盘平均亮温度. 太阳在那天基本处于宁静状态, 天线A2接收到的功率值(任意单位)和定标后的太阳圆盘平均亮温度也基本维持不变.

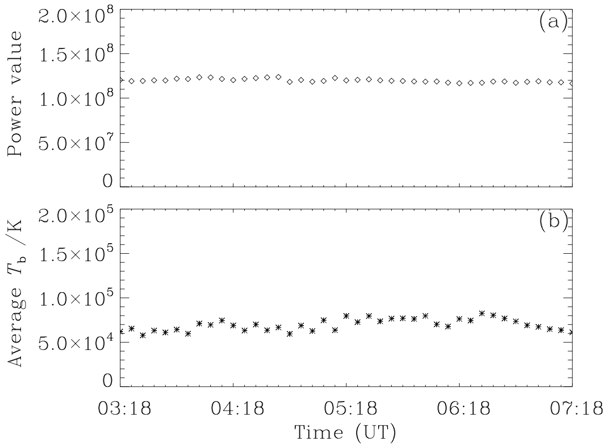

图 5　2016年7月5日MUSER图像强度定标后在1.7125 GHz的太阳圆盘平均亮温度与单天线接收到的功率值之间的对比: (a)为天线A2接收到的功率值(任意单位), (b)为图像定标后的太阳圆盘平均亮温度.

Fig. 5　Comparison between the average brightness temperature of solar disk at 1.7125 GHz after MUSER image intensity calibration and the power value received by a single antenna on July 5, 2016: (a) power value (in arbitrary unit) received by antenna A2, (b) average brightness temperature of solar disk after image intensity calibration.

对于2015年11月22日的MUSER数据, 当天太阳有射电爆发事件, 活动区AR12454在01:37–02:27 UT发生了GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)软X射线C5.1级的耀斑, 在03:17–03:25 UT发生了GOES软X射线C1.2级的耀斑, 在05:31–05:38 UT发生了GOES软X射线C5.6级的耀斑. 而MUSER在04:51–04:53 UT和05:35–05:38 UT期间观测到太阳射电爆发, 在相应时间段, RSTN在1415 MHz、2695 MHz、4995 MHz、8800 MHz、15400 MHz等频点上也观测到射电爆发. 定标后活动区AR12454对应的射电源在04:51–04:53 UT爆发过程中的亮温度以及单天线的功率值变化情况如图6所示. 图6 (a)为2015年11月22日天线A2的功率值(任意单位), 图6 (b)为定标后图像中最大的亮温度值在射电爆发期间的变化情况, 即活动区AR12454对应的射电源亮温度变化情况. 同时, 也计算了图6 (a)中的功率数据与图6 (b)中的亮

温度数据的相关系数R, 结果如图7所示. 从图中可以明显看出, 射电源在射电爆发期间的亮温度和单天线接收到的功率值(任意单位)具有相同的变化趋势, 且它们之间的相关系数大于0.95.

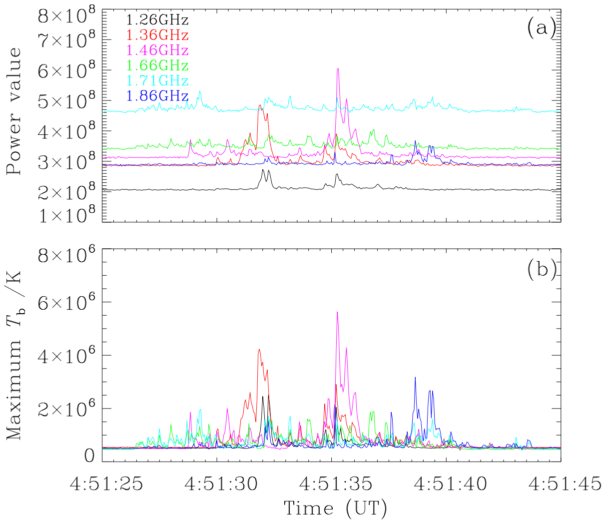

图 6　2015年11月22日MUSER图像强度定标后不同频率射电源在爆发期间的亮温度变化: (a)为天线A2接收到的功率值(任意单位), (b)图像定标后射电源亮温度的变化.

Fig. 6　Brightness temperature change of radio source during the burst period after MUSER image intensity calibration at different frequencies on November 22, 2015: (a) power value (in arbitrary unit) received by antenna A2, (b) brightness temperature change of radio source after image intensity calibration.

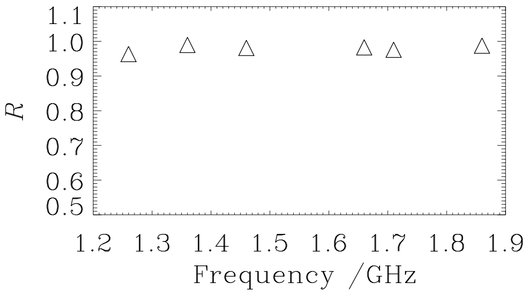

图 7　2015年11月22日不同频率接收到的功率值(任意单位)与图像强度定标后射电源的亮温度的相关性

Fig. 7　Correlation between the power values (in arbitrary unit) received and the brightness temperature of the radio source after image intensity calibration at different frequencies on November 22, 2015

图8展示了MUSER观测到的宁静太阳亮温度和其他结果的对比, 红色菱形符号表示MUSER观测到的值, 红色的线为拟合观测值得到的曲线, 黑色的线表示的是Zirin等[13]观测的结果, 绿色的线则是Tan等[18]结合宁静太阳大气的电子密度、电子温度模型和怀柔频谱仪十多年的观测数据得到的结果. MUSER拟合曲线介于两个其他结果之间, 与Tan等[18]得到的亮温度曲线具有非常高的相关性, 达到0.96, 从这些结果也反映了定标结果的准确性.

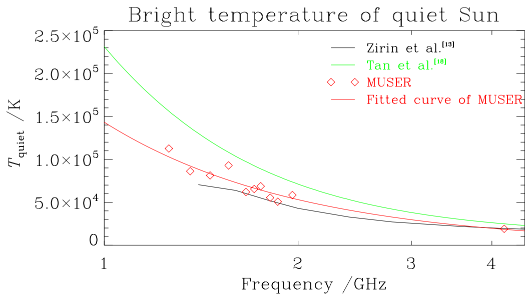

图 8　MUSER观测到的宁静太阳亮温度和其他结果的对比

Fig. 8　Comparison between the quiet solar brightness temperature observed by MUSER and other results

4　结论

在射电天文观测中, 射电图像的亮温度是天体物理研究的一个重要物理参数, 对其进行定标是射电望远镜数据处理的重要一环. 太阳射电观测与微弱宇宙天体的射电观测不同, 由于太阳射电信号较强, 射电日像仪的灵敏度要求并不是太高. 太阳射电辐射的动态范围很大, 且其物理结构比较复杂, 既有大尺度的展源结构, 还有活动区、耀斑、日珥等相应的小尺度结构. 因此, 不能利用传统的射电望远镜定标方法来实现对射电日像仪的图像强度定标.

基于太阳射电图像数据中含有太阳圆盘的结构信息, 且其主要反映在阵列短基线的可见度数据中, 本文提出了一种适用于射电日像仪的图像亮温度定标的方法. 利用短基线的幅度信息拟合第一类贝塞尔函数, 可以得到图像中宁静太阳圆盘的射电半径和强度. 再利用瑞利-金斯定律和每天太阳射电流量即可得出每天图像的定标因子G_c, 从而实现

对射电日像仪的图像定标.

利用文中提出的方法对MUSER观测的太阳图像进行了亮温度定标, 包括宁静太阳和有太阳射电爆发等不同的情况. 结果显示每天得到的定标因子误差较小, 定标后的亮温度与单天线接收到的功率值变化趋势相同, 具有很强的相关性. 同时, 得到不同频率的宁静太阳亮温度与其他文献的结果也比较吻合, 说明了此定标方法的有效性和可靠性.

参 考 文 献

[1] 颜毅华. 第3章太阳射电频谱成像观测//史建魁, 叶永煊, 刘振兴. 空间物理学进展(第5卷). 北京: 科学出版社, 2015: 71-85

[2] Aschwanden M. Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions. Second Edition. Berlin: Springer, 2005: 639-640

[3] Chen P F. LRSP, 2011, 8: 1

[4] Lin R P. Particle Acceleration and Transport in the Heliosphere and Beyond. AIP Conference Proceedings, Kyoto, Japan, June 20-25, 2008

[5] Chen X Y, Yan Y H, Tan B L, et al. ApJ, 2019, 878: 78

[6] Yan Y H, Zhang J, Wang W, et al. EM&P, 2009, 104: 97

[7] Yan Y H, Chen Z J, Wang W, et al. FrASS, 2021, 8: 584043

[8] Thompson A R, Moran J M, Swenson G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Third Edition. New York: Springer Nature, 2017: 91-94

[9] 王威, 颜毅华, 刘东浩, 等. 电子学报, 2019, 47: 4

[10] Zhou Z C, Yan Y H, Chen L J, et al. RAA, 2022, 22: 105019

[11] Geng L H, Yan Y H, Chen Z J, et al. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, Seoul: IEEE, 2016: 1998-1999

[12] Zhang M H, Zhang Y, Yan Y H, et al. RAA, 2021, 21: 284

[13] Zirin H, Baumert B M, Hurford G J. ApJ, 1991, 370: 779

[14] Fedotova A, Altyntsev A, Kochanov A, et al. et al. STP, 2019, 5: 27

[15] Fleishman G D, Loukitcheva M A, Kopnina V Y, et al. ApJ, 2018, 867: 81

[16] Ranganath G S. Resonance, 2008, 13: 115

[17] Penzias A A, Wilson R W. ApJ, 1965, 142: 419

[18] Tan C M, Yan Y H, Tan B L, et al. ApJ, 2015, 808: 61

Intensity Calibration for the Mingantu Spectral Radioheliograph Images

ZHOU Zhi-chao[1,2] CHEN Lin-jie[1] YAN Yi-hua[1,2] WANG Wei[1]

(1 State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The Mingantu Spectral Radioheliograph (MUSER), a new generation of solar dedicated radio imaging spectroscopic telescope, has realized high-time, high-angular, and high-frequency resolution imaging of the Sun in the 0.4–15 GHz ultra-broadband frequency range. The radio brightness temperature is an important parameter to describe the solar physical process. It plays a very important role in the study of different radio radiation mechanisms, solar magnetic field and the acceleration of non-thermal particles in the solar burst process. Therefore, the image of radioheliograph must be calibrated for brightness temperature. This paper introduces a method suitable for radioheliograph image intensity calibration. The solar radio image contains the structural information of the solar disk. The radio radius and intensity of the quiet solar disk in the image can be obtained by fitting the first kind of Bessel function with the visibilities of short baselines of the radioheliograph. Then, the Rayleigh-Jeans law and the daily solar radio flux can be used to calculate the calibration factor $G_{\rm c}$ of the daily image, so as to realize the calibration of the MUSER image intensity. Applying this method to the actual observation data of MUSER, including different situations such as the quiet sun and solar radio bursts, the error of the daily calibration factor $G_{\rm c}$ is within 10% of its value, and the obtained bright temperature of the quiet sun has a high correlation with the result obtained by other people. These indicate the feasibility and effectiveness of this method.

Key words Sun: radio radiation, instrumentation: radioheliograph, instrumentation: calibration